

Lecciones Aprendidas



De los participantes de Natural Gas STAR

REEMPLAZO DE DESHIDRATADORES DE GLICOL CON DESHIDRATADORES DESECANTES (Replacing Glycol Dehydrators with Desiccant Dehydrators)

Resumen gerencial

Existen aproximadamente 30,000 pozos de gas natural de alta presión en tierra que producen 4 billones de pies cúbicos (Tcf) anualmente en los Estados Unidos. Cerca de 700 de estos pozos tienen deshidratadores convencionales de glicol, los cuales se calcula que emiten a la atmósfera mil millones de pies cúbicos (Bcf) de metano al año. Los deshidratadores de glicol ventilan metano, compuestos orgánicos volátiles (VOC) y contaminantes peligrosos del aire (HAP) a la atmósfera del regenerador de glicol y también fugan gas natural de los dispositivos neumáticos de control. Este proceso desperdicia gas, cuesta dinero y contribuye a agravar los problemas locales de calidad de aire así como al cambio climático mundial.

Los participantes de Natural Gas STAR han descubierto que reemplazar los deshidratadores de glicol con deshidratadores desecantes reduce las emisiones de metano, los compuestos orgánicos volátiles y los contaminantes peligrosos del aire en un 99 por ciento y también reduce los costos de operación y mantenimiento. En un deshidratador desecante, el gas húmedo pasa a través de una cama de secado de tabletas desecantes. Las tabletas extraen la humedad del gas y se disuelven gradualmente durante el proceso. Ya que la unidad está completamente cerrada, las emisiones de gas ocurren solamente cuando se abre la cámara, como cuando se añaden tabletas desecantes.

Análisis económicos demuestran que el reemplazar un deshidratador de glicol que procesa 1 millón de pies cúbicos al día (MMcfd) de gas con un deshidratador desecante puede ahorrar hasta \$4,403 al año en gas combustible, gas ventilado y costos de operación y mantenimiento (O&M) y reduce las emisiones de metano en 564 mil pies cúbicos (Mcf) al año. Este estudio de Lecciones Aprendidas describe cómo los participantes pueden identificar las áreas en donde los deshidratadores desecantes pueden incorporarse y determinar los beneficios económicos y para el medio ambiente.

Método para reducir la pérdida de gas ¹	Ahorros anuales de emisiones de metano (Mcf) ²	Ahorros anuales de gas (Mcf) ³	Valor del ahorro de gas (\$) ⁴	Costo de capital e instalación (\$) ⁵	Costo de operación y mantenimiento (\$) ⁶	Plazo de recuperación de la inversión (años)
Reemplazo de un deshidratador de glicol con un deshidratador desecante	564	1,063	3,189	12,750	(1,214)	2.9

¹ Se basa en un deshidratador MMcfd que opera a 450 psig y 47°F.

² La diferencia entre el metano ventilado de los deshidratadores de glicol y los desecantes.

³ Es la suma de las emisiones netas de gas y los ahorros de gas combustible.

⁴ Se basa en un precio de gas de \$3 por Mcf.

⁵ El costo del deshidratador desecador instalado menos el valor excedente del equipo del deshidratador de glicol reemplazado.

⁶ La diferencia entre los costos de operación y mantenimiento de los deshidratadores de glicol y los desecantes.

Esta publicación es una de la serie de resúmenes de Lecciones Aprendidas preparados por EPA en colaboración con la industria de gas natural que comprenden las aplicaciones superiores del Programa de Mejores Prácticas Administrativas (BMP, por sus siglas en inglés) de Natural Gas STAR y Oportunidades Identificadas por los Participantes (PRO, por sus siglas en inglés).

Antecedentes tecnológicos

El gas natural producido normalmente está saturado de agua. Si no se le extrae, el agua puede condensarse y congelarse en las tuberías recolectoras, de transmisión y distribución causando taponeado, variaciones de presión y corrosión. Para evitar esos problemas, el gas producido usualmente se envía a través de un deshidratador en donde entra en contacto con un agente desaguador como el trietilenglicol (TEG), dietilenglicol (DEG) o carbonato de propileno. En el proceso más común, la deshidratación del glicol, el trietilenglicol absorbe el agua del gas junto con el metano, los componentes orgánicos volátiles y los contaminantes peligrosos del aire. Los hidrocarburos y el agua absorbidos después se hierven en un rehervidor o regenerador y se ventilan a la atmósfera. (Vea las *Lecciones Aprendidas de EPA: Optimización de la circulación de glicol e instalación de depósitos separadores de líquido de los deshidratadores de glicol (Optimize Glycol Circulation and Install Flash Tank Separators in Glycol Dehydrators)*)

Los participantes de Natural Gas STAR han reportado tener éxito al usar un método alternativo para el secado del gas: los deshidratadores desecantes. Esos deshidratadores usan sales absorbentes de humedad para eliminar el agua del gas sin emitir cantidades grandes de metano, componentes orgánicos volátiles o contaminantes peligrosos del aire.

Desecantes

Las sales delicuescentes como el calcio, el potasio y los cloruros de litio, se han usado en las industrias del gas y el petróleo para deshidratar productos de petróleo durante más de 70 años. Estas sales atraen y absorben naturalmente la humedad (higroscópicas), disolviéndose gradualmente hasta formar una solución de agua salada. La cantidad de humedad que puede extraerse del gas de hidrocarburo depende del tipo de desecante así como de la temperatura y la presión del gas. El cloruro de calcio, el desecante más común y económico, puede lograr contenidos de humedad de calidad en las tuberías a temperaturas por debajo de 59°F y presiones por encima de 250 psig. El cloruro de litio, que es más caro, tiene una gama más amplia de operación: hasta 70°F y por encima de 100 psig. El Apéndice A ofrece contenidos equilibrados de humedad de gas natural deshidratado mediante sales de calcio y cloruro de litio disponibles comercialmente.

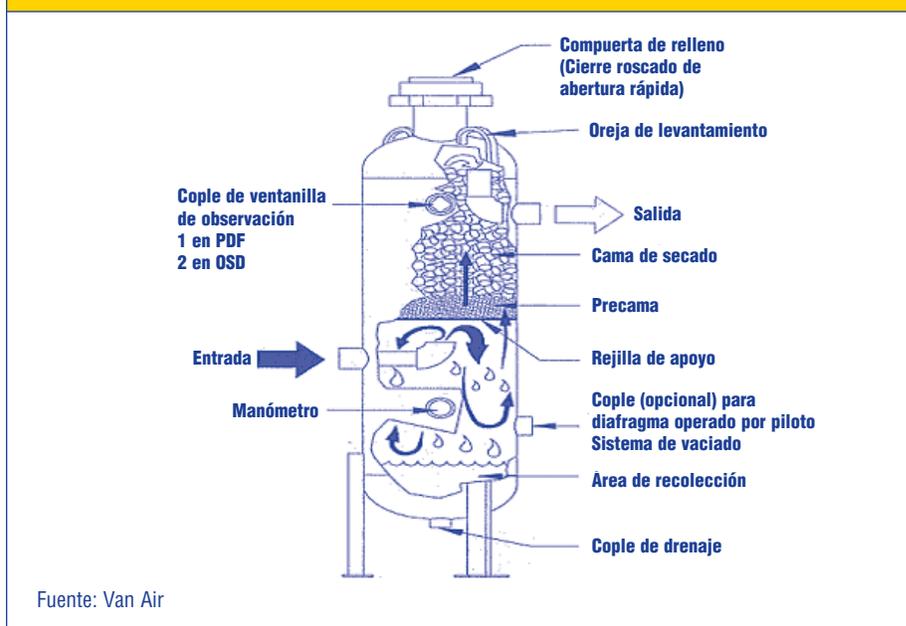
Descripción del proceso

El deshidratador desecante es un dispositivo muy sencillo; no tiene partes móviles y no necesita un suministro de energía externo, por lo tanto, es ideal para las zonas remotas.

Como se muestra en el Cuadro 1, el gas natural húmedo entra a la parte inferior de la cámara deshidratadora, debajo de la rejilla de apoyo del desecante. La rejilla de apoyo y la antecama de bola cerámica evitan que las tabletas desecantes caigan en el colector de agua salada (área de recolección). El gas mojado fluye hacia arriba a través de la cama de secado. Cuando el gas entra en contacto con la superficie de las tabletas, las sales desecadoras extraen el vapor de agua del gas (hidratado). Conforme el desecante continúa extrayendo el vapor de agua del gas, comienzan a formarse gotas de agua salada y a caer a través de la cama de secado hacia el colector de recolección de agua salada (área de recolección) en la parte inferior de la cámara. Este proceso de formación de agua salada disuelve gradualmente el desecante.

El agua salada recolectada en el área de recolección puede drenarse periódicamente a un tanque de almacenamiento de agua salada (o agua producida) o (en donde

Cuadro 1: Esquema de un deshidratador desecante de cámara sencilla



se permite) a un estanque de evaporación. El agua y la sal producidas pueden inyectarse en un pozo profundo cerca del lugar, o recogerse periódicamente para desecharse lejos del sitio.

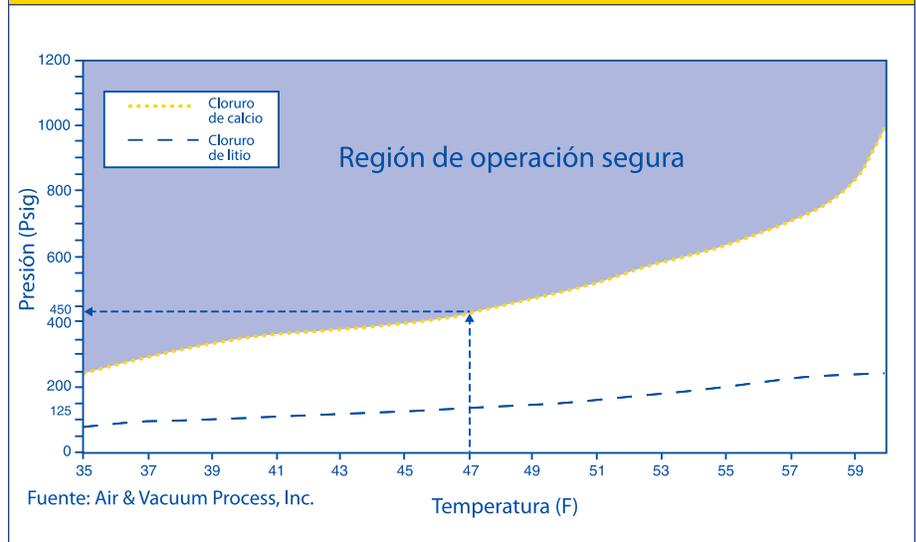
Con una cama de secado de suficiente profundidad, el gas llega a un contenido equilibrado de humedad con el desecante antes de que éste llegue a la parte superior de la cama de secado. A la sal excesiva, encima de la profundidad mínima necesaria para lograr el contenido equilibrado de humedad, se le llama “cama de servicio”. Este inventario de servicio se rellena con regularidad. Para evitar detener la producción de gas o desviar el gas mojado a una tubería de venta cuando se rellena el deshidratador desecante, la mayoría de las instalaciones usan cuando menos dos cámaras: uno en servicio de secado mientras que el otro se rellena de sal.

Requisitos de operación

Para proteger sus tuberías, los productores secan el gas a un punto de condensación por debajo de la temperatura mínima que se espera en la tubería. Si no se seca correctamente el gas, el agua y los otros líquidos libres pueden precipitarse al enfriarse el gas lo cual puede causar que la tubería se bloquee o corra. Para evitar eso, los productores normalmente deshidratan el gas a una especificación de humedad de tubería entre 4 y 7 libras de agua por un millón de pies cúbicos al día (MMcf) de gas. Las curvas de desempeño de desecante muestran combinaciones de temperatura y presión que causarán que el gas cumpla con las normas de humedad de las tuberías. El Cuadro 2, derivado de la tabla de contenido de humedad del Apéndice A, muestra las combinaciones de temperatura y presión que darán como resultado 7 libras de agua por un millón de pies cúbicos al día (MMcf) de gas en dos de los más comunes desecadores. La región sombreada encima de la línea de saturación del Cuadro 2 representa la “región segura de operación” para los deshidratadores de cloruro de calcio en donde el gas estará dentro o por debajo de la especificación de humedad de tuberías. Los operadores usan estas

curvas para determinar la presión mínima de gas que se requiere para garantizar un contenido dado de humedad. En este ejemplo, una entrada de gas a 47°F que pasa a través de un deshidratante desecante de cloruro de calcio debe estar presurizada a por lo menos 450 psig para cumplir con las 7 libras de agua por MMcf estándar. Se muestran curvas para el cloruro de litio y de calcio, aunque el cloruro de litio se usa raramente debido a su costo.

Cuadro 2: Curvas de desempeño de desecante al requisito máximo de contenido de humedad en tuberías (7 lb. de agua/MMscf)



Relleno de desecantes y drenado de agua salada

Conforme las tabletas desecantes absorben humedad del gas, la profundidad de las tabletas desecantes de la cama de secado lentamente se reduce. Algunos fabricantes colocan una “ventanilla de observación” (mirilla) en la cámara (vea el Cuadro 1) al nivel mínimo desecante. Cuando la parte superior del desecante llega a la ventanilla de observación, el operador tiene que rellenar el desecante hasta el nivel máximo. Rellenar la cama de servicio es una operación manual que implica cambiar el flujo del gas a otra cámara de deshidratación, cerrar las válvulas para aislar la cámara “vacía”, ventilar la presión del gas a la atmósfera, abrir la compuerta superior de llenado y verter las bolitas desecantes en la cámara. Esto requiere que el operador vacíe una o más bolsas de sal de 30 a 50 libras a la cámara, dependiendo del diseño del deshidratador. Debido a que este procedimiento necesita realizarse más frecuentemente entre mayor es la producción de gas, los deshidratadores desecantes generalmente se usan cuando el volumen de gas a secarse es de 5 MMcfd o menos.

El agua salada del área de reclamación algunas veces se drena manualmente (los deshidratadores desecantes típicamente acumulan de 10 a 50 galones de agua salada a la semana). El drenaje a un estanque de evaporación se lleva a cabo mejor después de que la cámara se despresuriza, mientras que el drenado a un tanque de agua producida puede hacerse antes de despresurizar la cámara; aprovechando la presión de gas para empujar el agua salada hacia el tanque. En ocasiones poco frecuentes puede bombearse al agua salada a un camión tanque usando una bomba neumática tipo doble.

Beneficios económicos y para el medio ambiente

El uso de deshidratadores desecantes como alternativa a los deshidratadores de glicol puede rendir importantes beneficios económicos y para el medio ambiente, incluyendo:

- ★ **Costo reducido de capital**—Los costos de capital de los deshidratadores desecantes son bajos en comparación a los costos de capital de los deshidratadores de glicol. Los deshidratadores desecantes no usan bombas de circulación, controles neumáticos, calentadores de gas ni rehervidores/regeneradores encendidos.
- ★ **Costos reducidos de operación y mantenimiento**—Los deshidratadores de glicol queman una cantidad importante de gas producido para combustible en un calentador de gas y un regenerador de glicol. Si la válvula de drenado de agua salada es automática, el único costo de operación y mantenimiento para un deshidratador desecante es para rellenar el desecante.
- ★ **Emisiones mínimas de metano, de componentes orgánicos volátiles y contaminantes peligrosos del aire**—Los deshidratadores de glicol ventilan continuamente gas a la atmósfera desde los dispositivos neumáticos y el ventilador del regenerador de trietilenglicol. Las únicas emisiones de gas de los deshidratadores desecantes ocurren durante la despresurización de la cámara desecante para el relleno de sal, típicamente un volumen de cámara por semana. El agua salada se produce en pequeñas cantidades y absorbe poco hidrocarburo.

Proceso de decisión

Los participantes pueden evaluar las ubicaciones potenciales y los aspectos económicos de reemplazar los deshidratadores de glicol existentes con deshidratadores desecantes usando los siguientes cinco pasos.

Paso 1: Identificación de ubicaciones adecuadas.

Los deshidratadores desecantes son una elección económica bajo ciertas condiciones operativas. Su aplicabilidad se determina principalmente por la producción de gas y la temperatura y la presión del gas producido. Los deshidratadores desecantes funcionan mejor cuando el volumen a secarse es de 5 MMcfd o menor, y la humedad absorbida baja a las especificaciones de la tubería cuando la temperatura del gas de la cabeza de pozo está baja y la presión está alta. Si la temperatura de entrada del gas es demasiado alta, los desecantes forman hidratos que se precipitan de la solución y causan problemas de drenado de agua salada y apelmazamiento. Aunque es posible enfriar o comprimir el gas producido para poder usar los deshidratadores desecantes, estas medidas aumentan la complejidad del sistema y por lo general son muy costosas.

En comparación, los deshidratadores de glicol son una mejor elección para los pozos de producción más elevados y funcionan mejor para gas a mayor temperatura y a cualquier presión. Sin embargo, si la temperatura del gas producido es demasiado baja para el proceso de trietilenglicol, los operadores necesitarán calentar el gas antes de que entre al deshidratador. Ya que calentar el gas requiere que se queme más producto como combustible, estas situaciones pueden ser buenas candidatas para los deshidratadores desecantes. El Cuadro 3 muestra qué sistema de secado de gas funciona mejor bajo distintas condiciones de operación.

Cinco pasos para evaluar un deshidratador desecante:

1. Identificación de ubicaciones adecuadas
2. Determinación de la capacidad del deshidratador
3. Cálculo de los costos de capital y operación
4. Cálculo de los ahorros
5. Análisis de los aspectos económicos

Cuadro 3: Condiciones óptimas de operación para las tecnologías de deshidratación

	Presión baja (<100 psig)	Presión alta (>100 psig)
Baja temperatura (<70°F)	Desecante/glicol ¹	Desecante
Alta temperatura (>70°F)	Glicol	Glicol/desecante ²

¹ El gas quizás tenga que calentarse para usar un deshidratador de glicol, o comprimirse para usar un deshidratador desecante.
² El gas quizás tenga que enfriarse para usar un deshidratador desecante.

Paso 2: Determinación de la capacidad del deshidratador. El primer paso para el cálculo del tamaño de un deshidratador desecante es determinar el contenido de humedad de entrada y salida del gas. Esto es necesario para calcular la cantidad de desecante necesario, y a partir de ello, el tamaño de la cámara. Los operadores usan una gráfica de contenido de vapor de agua en el gas natural (el ejemplo se muestra en el Apéndice B), una tabla de contenido de humedad o un programa medidor como el Quick Size de Hanover Company, que se encuentra en www.hanover-co.com/home/products/index.html, para calcular el contenido del agua en la corriente de gas. Para este análisis, supondremos que el deshidratador está designado para manejar una corriente de gas de 1 MMscf/día a 47°F y 450 psig. Para este panorama, usar cualquiera de estos métodos rendirá los mismos resultados, la corriente de gas natural contiene 21 libras de agua por MMcf.

Para poder cumplir con las especificaciones de humedad de la tubería de 7 libras por MMcf, el desecante de cloruro de calcio debe extraer 14 libras de agua por MMcf de gas. Para un deshidratador de 1 MMcfd, y usando la regla general del distribuidor de que 1 libra de desecante extrae 3 libras de agua, se disolverán 4.7 libras de cloruro de calcio al día. El Cuadro 4 resume estos cálculos.

Regla general del distribuidor

Una libra de desecante extrae tres libras de humedad del gas.

El paso siguiente es calcular el tamaño de la cámara. Los distribuidores suministran cámaras de deshidratadores desecantes en tamaños estándar, generalmente especificados por el diámetro exterior y la producción máxima de gas a varias presiones de operación, según se muestra en el Cuadro 6. Las dimensiones de la cama son fijas para lograr el contenido equilibrado de humedad del gas. Esto incluye un tamaño estándar de profundidad de la cama de servicio: 5 pulgadas para este distribuidor.

Los participantes pueden seleccionar el tamaño de la cámara desecante en la tabla del distribuidor o calcular el tamaño usando las ecuaciones del Cuadro 5. En el ejemplo del deshidratador de 1 MMcfd, al usar el Cuadro 5 se obtiene una cámara con un diámetro interior de 16.2 pulg. (17 pulg. de diámetro exterior aproximadamente con un espesor de pared de 3/8 de pulg.). Para usar el Cuadro 6, siga la columna de 450 psig hacia abajo hasta la capacidad de producción igual o mayor a la que se necesita; en este ejemplo es 1,344 Mcfd (1.344 MMcfd). Siguiendo esta hilera a la izquierda da un diámetro exterior de 20 pulgadas.

Cuadro 4: Determinación del consumo diario de desecante

En donde:

D	= Consumo diario de desecante (lb/día)
F	= Tasa de flujo de gas (MMcf/día)
I	= Contenido de agua de entrada (lb/MMcf)
O	= Contenido de agua de salida (lb/MMcf)
B	= Proporción de desecante con respecto al agua (lb de desecante/ lb de agua)

Dada la siguiente información:

F	= 1 MMcf/día de gas producido a 47°F y 450 psig
I	= 21 lb/MMcf
O	= 7 lb/MMcf (requisito de humedad de la tubería)
B	= 1 lb de desecante/ 3 lb de agua (regla general del distribuidor)

Calcule:

$$\begin{aligned} D &= F * (I-O) * B \\ &= 1 * (21-7) * 1/3 \\ &= 4.7 \text{ lb desecante/día} \end{aligned}$$

Cuadro 5: Determinación del tamaño del deshidratador desecante

En donde:

ID	= Diámetro interior de la cámara desecante (pulg.)
D	= Consumo diario de desecante (lb/día)
H	= Altura de la cama de sal de servicio (pulg.)
T	= Tiempo entre rellenos (días)
B	= Densidad a granel (lb/pies ³)

Dada la siguiente información:

D	= 4.7 lb/día (Cuadro 4)
H	= 5 pulg. (regla general del distribuidor)
T	= 7 días (a elección del operador)
B	= 55 (lb/pies ³) (datos del distribuidor)

Calcule:

$$\begin{aligned} ID &= 12 * \sqrt{\frac{4 * D * T * 12}{H * \pi * B}} \\ &= 12 * \sqrt{\frac{4 * 4.7 * 7 * 12}{5 * \pi * 55}} \\ &= 16.2 \text{ pulg.} \end{aligned}$$

Seleccione un tamaño estándar de cámara en el Cuadro 6:

- Seleccione el siguiente tamaño más grande que el ID = 20 pulg.

Cuadro 6: Costo y capacidad máxima de producción (Mcf/d) de los deshidratadores desecantes

Diámetro externo (pulgadas)	Costo ^{1,2} (\$)	100 Psig	200 Psig	300 Psig	350 Psig	400 Psig	450 Psig	500 Psig
10	2,850	95	177	260	301	342	383	424
12	3,775	132	247	362	419	476	533	590
16	5,865	214	400	587	680	773	866	959
20	6,500	311	620	909	1,054	1,199	1,344	1,489
24	8,895	481	900	1,319	1,528	1,738	1,948	2,158
30	12,850	760	1,422	2,085	2,416	2,747	3,078	3,409
36	17,034	1,196	2,230	3,270	3,789	4,308	4,827	5,346

¹ El costo de capital es para los índices de presión de hasta 500 psig, incluyendo una cámara con apoyos de cámara, válvulas, tubería, todos los accesorios y el relleno inicial de las tabletas desecantes de cloruro de calcio.

² El costo del deshidratador incluye todos los accesorios: cámara, estructura de apoyo, válvulas y tubería.

Fuente: Van Air

Paso 3: Cálculo de los costos de capital y operación. El costo de capital para un deshidratador desecante de cámara sencilla adecuado para tasas de producción de gas de 0.1 a 5 MMcf al día (incluyendo el relleno inicial de desecante) varía entre \$3,000 y \$17,000. Después de determinar el tamaño necesario de la cámara (Paso 2), los participantes pueden usar el Cuadro 6 para determinar el costo de capital de un deshidratador desecante. Para el ejemplo que se ofrece en el Paso 2, el costo de capital de un deshidratador desecante de cámara sencilla de 20 pulgadas es \$6,500. Para un deshidratador de dos cámaras, el costo será \$13,000.

Los costos de instalación generalmente fluctúan entre 50 y 75 por ciento del costo del equipo. Usando un factor de instalación de 75 por ciento del costo del equipo, el deshidratador desecante de cámara sencilla descrito anteriormente se instalaría a un costo de \$4,875.00. El deshidratador de dos cámaras se instalaría a un costo de \$9,750.00.

El costo de operación para usar el deshidratador desecante incluye el costo del reemplazo de desecante y el desecho del agua salada. Debido a que las tabletas desecantes se disuelven al recoger la humedad del gas, la cama de servicio de sal tendrá que rellenarse con regularidad. El agua salada que resulte también tiene que extraerse y tratarse o desecharse.

El Cuadro 7 muestra los cálculos de los costos de operación para el ejemplo de un deshidratador de 1 MMcf/d. Dependiendo del distribuidor, el costo del cloruro

de calcio puede fluctuar de \$0.65 a \$1.20 por libra. Usando \$1.20 por libra para el costo del cloruro de calcio, el costo total para rellenar 4.7 libras al día (del Cuadro 4) es \$2,059 por año. En el ejemplo del Cuadro 4, se produce muy poca agua salada al extraer la humedad del gas para lograr la especificación deseada de humedad de la tubería (por ejemplo, 7 libras por MMcf): 4.7 libras al día de sal más las 14 libras de agua extraídas del gas, o 18.7 libras de agua salada al día, un poco más de 2 galones al día.

Cuadro 7: Determinación del costo de operación de un deshidratante desecante

En donde:

TO	= Costo total de operación (\$/año)
CD	= Costo de desecante (\$/año)
CB	= Costo de desecho del agua salada (\$/año)
I	= Contenido de agua de entrada (lb/MMcf)
O	= Contenido de agua de salida (lb/MMcf)
F	= Tasa de flujo de gas (MMcf/día)
P	= Precio del desecante (\$/libra)
D	= Consumo diario de desecante (lb/día)
S	= Densidad del agua CaCl ₂ (libras/bbl)
BD	= Costo de desecho del agua salada (\$/bbl)
LC	= Costo de mano de obra (\$)
LT	= Tiempo de mano de obra para que el operador rellene el desecante (hora)
LR	= Tasa de mano de obra del operador (\$/hora)

Dada la siguiente información:

F	= 1 MMcf/día de gas producido a 47°F y 450 psig
P	= \$1.20/libra de cloruro de calcio (datos del distribuidor)
D	= 4.7 lb desecante/día (Cuadro 4)
S	= 490 lb/bbl
BD	= \$1.00/bbl ¹
LT	= 1 hora/semana
LR	= \$30/hora

Calcule:

CD	= D*P*365 días/año = 4.7*1.2*365 = \$2,059/año
CB	= $\frac{[(I-O)*F+D]*BD*365 \text{ días/año}}{S}$ = $\frac{[(21-7)*1+4.7]*1.0*365}{490}$ = \$14/año
LC	= LT*LR*52 semanas/año = 1*30*52 = \$1,560/año
TO	= CD+CB+LC = \$2,059+\$14+\$1,560 = \$3,633/año

¹ GRI *Atlas de agua producida en relación al gas en 1990, mayo 1995.*

Paso 4: Cálculo de los ahorros. Reemplazar un deshidratador de glicol con un deshidratador desecante ahorra gas y reduce considerablemente los costos de operación y mantenimiento.

Determinación de los ahorros netos de gas

La cantidad de gas ahorrada puede determinarse comparando las emisiones y el uso de gas del deshidratador de glicol existente con el gas que se ventila de un deshidratador desecante. Los participantes pueden determinar los ahorros de gas determinando los siguientes cinco factores.

Determine los ahorros netos de gas:

Añada los ahorros de la eliminación de:

- El gas ventilado del deshidratador de glicol.
- El gas ventilado de los controladores neumáticos.
- El gas quemado como combustible en el rehervidor de glicol.
- El gas quemado como combustible en un calentador de gas.

Reste:

- El gas ventilado del deshidratador desecante.

★ **Cálculo del gas ventilado del deshidratador de glicol**—La cantidad de gas ventilado del regenerador/rehervidor de glicol es igual al gas arrastrado en trietilenglicol. Para determinar esto, los participantes necesitarán conocer la tasa de flujo de gas, el contenido de agua de entrada y salida, la proporción de glicol en comparación con el agua, el porcentaje de la circulación excesiva y la tasa de arrastre de metano. El Cuadro 8 demuestra este cálculo para el

Cuadro 8: Gas ventilado del deshidratador de glicol	
En donde:	
GV	= Cantidad de gas ventilado anualmente (Mcf/año)
F	= Tasa de flujo de gas (MMcf/día)
W	= Contenido de agua de entrada-salida (lb/MMcf)
R	= Proporción de glicol por agua (gal/lb) ¹
OC	= Porcentaje de circulación excesiva
G	= Tasa de arrastre de metano (pies ³ /gal) ¹
Dada la siguiente información:	
F	= 1 MMcfd de gas a 47°F y 450 psig
W	= 21 - 7 = 14 lb agua/MMcf (Cuadro 4)
R	= 3 gal/lb (regla general) ¹
G	= 3 pies ³ /gal para las bombas de intercambio de energía (regla general) ¹
OC	= 150%
Calcule:	
GV	$= \frac{(F \cdot W \cdot R \cdot OC \cdot G \cdot 365 \text{ días/año})}{1,000 \text{ cf/Mcf}}$ $= \frac{(1 \cdot 14 \cdot 3 \cdot 1.5 \cdot 3 \cdot 365)}{1,000}$ $= 69 \text{ Mcf/año}$
¹ De las Lecciones Aprendidas de EPA: <i>Optimización de la circulación de glicol e instalación de depósitos separadores de líquido en los deshidratadores de glicol (Optimize Glycol Circulation and Install Flash Tank Separators in Glycol Dehydrators).</i>	

ejemplo del deshidratador de 1 MMcfd. En este ejemplo, se supone que hay una bomba de intercambio de energía sin depósito separador de líquido. Uso de reglas generales de las Lecciones Aprendidas de EPA: *Optimización de la circulación de glicol e instalación de depósitos separadores de líquido en los deshidratadores de glicol (Optimize Glycol Circulation and Install Flash Tank Separators in Glycol Dehydrators)*, se calculan las emisiones de gas de metano de 69 Mcf al año.

- ★ **Cálculo del gas ventilado de los controladores neumáticos**—Los controladores neumáticos se usan comúnmente para vigilar y regular los flujos de gas y líquido, la temperatura y la presión de las unidades deshidratadoras de glicol. Específicamente, los controladores regulan los flujos de gas y líquido en los deshidratadores y los separadores, la temperatura en los regeneradores deshidratadores y la presión en los depósitos de líquidos (cuando se usan). En este ejemplo, la unidad deshidratadora de glicol con calentador de gas se considera que tiene cuatro controladores neumáticos de exudación; los controladores de nivel en el contactor y el rehervidor y los controladores de temperatura en el rehervidor y el calentador de gas. No tiene que ser un depósito separador de líquido. También se supone que todos los dispositivos neumáticos son dispositivos de alta exudación (por ejemplo, exudan más de 50 Mcf de gas al año durante la operación). Con base en el estudio de GRI/EPA, *Methane Emissions >From the Natural Gas Industry, Volume 12—Pneumatic Devices (Emisiones de metano de la industria del gas natural, volumen 12 - Dispositivos neumáticos)* el factor de emisiones anuales de un dispositivo neumático de exudado se calcula en 126 Mcf al año. Por lo tanto, los cuatro dispositivos neumáticos contribuirán anualmente con 504 Mcf de emisiones de metano. El Cuadro 9 resume este ejemplo.

Cuadro 9: Gas ventilado de los controladores neumáticos	
En donde:	
GB	= Exudación de gas (Mcf/año)
EF	= Factor de emisión (Mcf de exudación de gas natural/ dispositivo neumático por año) ¹
PD	= Número de dispositivos neumáticos
Dada la siguiente información:	
EF	= 126 Mcf/dispositivo/año
PD	= 4 dispositivos neumáticos/ deshidratadores de glicol
Calcule:	
GB	= EF*PD
	= 126* 4
	= 504 Mcf/año
<small>¹ Estudio de GRI/EPA, <i>Methane Emissions from the Natural Gas Industry [Emisiones de metano de la industria del gas natural]</i>, Volumen 12.</small>	

- ★ **Cálculo del gas quemado como combustible en rehervidores de glicol**—El deshidratador de glicol usa gas natural en el rehervidor/regenerador para consumir el agua del glicol rico. Suponiendo que el calor del rehervidor sea de 1,124 Btu por galón de trietilenglicol, el gas usado por el rehervidor será de 17 Mcf al año. El Cuadro 10 resume estos cálculos.

Cuadro 10: Gas quemado como combustible en el rehervidor de glicol

En donde:

FGR	= Gas combustible para el rehervidor (Mcf/año)
F	= Tasa de flujo de gas (MMcfd)
W	= Contenido de agua de entrada-salida (lb/MMcf)
Qr	= Servicio de calor del rehervidor (Btu/gal de trietilenglicol [TEG]) ¹
Hv	= Valor de calentamiento del gas natural (Btu/scf) ²
R	= Proporción de glicol por agua (gal de TEG/lb de agua) ³

Dada la siguiente información:

F	= 1 MMcfd
W	= 21 - 7 = 14 lb agua/MMcf
Qr	= 1,124 Btu/gal de TEG
Hv	= 1,027 Btu/scf
R	= 3 gal TEG/lb de agua extraída

Calcule:

$$\begin{aligned}
 \text{FGR} &= \frac{(F \cdot W \cdot Q_r \cdot R \cdot 365 \text{ días/año})}{H_v \cdot 1,000 \text{ cf/Mcf}} \\
 &= \frac{(1 \cdot 14 \cdot 1,124 \cdot 3 \cdot 365)}{1,027 \cdot 1,000} \\
 &= 17 \text{ Mcf/año}
 \end{aligned}$$

¹ Se basa en el cálculo del *Libro de Datos de Ingeniería, Volumen II*, 11ª edición, Gas Processors Supply Association (Asociación de Proveedores Procesadores de Gas), 1998, Sección 20 – Deshidratación.

² Energy Information Administration (EIA), Monthly Engineering Review, Tabla A4.

³ De las Lecciones Aprendidas de EPA: *Optimización de la circulación de glicol e instalación de los depósitos separadores de líquido en los deshidratadores de glicol. (Optimize Glycol Circulation and Install Flash Tank Separators in Glycol Dehydrators).*

- ★ **Cálculo del gas quemado como combustible en un calentador de gas—** El trietilenglicol (TEG) no funciona bien en gas a temperatura baja. Por esta razón, el gas generalmente se calienta antes de entrar a la unidad deshidratadora. El gas natural se usa como combustible para el calentador de gas. La cantidad de gas combustible usado para calentar 1 MMcfd de gas producido de 47°F a (supuesto) 90°F es 483 Mcf al año. El Cuadro 11 muestra estos cálculos.
- ★ **Cálculo de la pérdida de gas del deshidratador desecante—** La pérdida de gas del deshidratador desecante se determina calculando la cantidad de gas que se ventila de la cámara cada vez que se despresuriza para realizar el proceso de relleno. Para determinar el volumen de gas ventilado, los participantes tendrán que determinar el volumen de la cámara del deshidratador y qué porcentaje de este volumen está ocupado por el gas. La cámara de 20 pulgadas de diámetro exterior del Cuadro 6 tendrá un diámetro interior aproximado de 19.25 pulgadas (suponiendo un espesor de pared de 3/8 pulgadas). La cámara tiene una longitud general de 76.75 pulgadas con el 45 por ciento de su volumen lleno de gas. Usando la Ley de Bolye, la cantidad de gas ventilado a la atmósfera durante la despresurización de la cámara es de 10 Mcf al año. El Cuadro 12 resume estos cálculos.

Cuadro 11: Cantidad de gas combustible que se usa para calentar el gas

En donde:

FGH	= Gas combustible usado en el calentador (Mcf/año)
Hv	= Valor de calentamiento del gas natural (Btu/scf)
Cv	= Calor específico del gas natural (Btu/lb°F)
D	= Densidad del gas natural (lb/cf)
ΔT	= $(T_2 - T_1)$ cambio en la temperatura (F°)
F	= Tasa de flujo de gas (MMcf/d)
E	= Eficiencia

Dada la siguiente información:

Hv	= 1,027 Btu/cf
Cv	= 0.441 Btu/lb°F
D	= 0.0502 lb/cf
ΔT	= 43 F° (90 - 47) F°
F	= 1 MMcf/d
E	= 70%

Calcule:

$$\begin{aligned}
 FGH &= \frac{(F \cdot D \cdot Cv \cdot \Delta T \cdot 365 \text{ días/año} \cdot 1,000 \text{ Mcf/MMcf})}{(Hv \cdot E)} \\
 &= \frac{(1 \cdot 0.0502 \cdot 0.441 \cdot 43 \cdot 365 \cdot 1,000)}{(1,027 \cdot 0.7)} \\
 &= 483 \text{ Mcf/año}
 \end{aligned}$$

- ★ **Cálculo de los ahorros totales de gas**—Los ahorros totales de gas es el total de emisiones que se evitaron y el uso del gas del deshidratador de glicol menos la pérdida de gas de la ventilación del deshidratador desecante cuando se reemplaza el desecante. En este ejemplo, el ahorro total de gas es 1,063 Mcf al año. Usando un precio de gas de \$3.00 por Mcf, el valor del gas que se ahorra es \$3,189 al año. El gas natural contiene 90 por ciento de metano. Por lo tanto, el total del ahorro de las emisiones de metano es el 90 por ciento de la diferencia entre el gas emitido por el deshidratador de glicol y sus controladores neumáticos (Cuadros 8 y 9 respectivamente), y el deshidratador desecante (Cuadro 12); en este caso fue 507 Mcf al año. El Cuadro 13 resume este ejemplo.

Cuadro 12: Pérdida de gas del deshidratador desecante

En donde:

GLD	= Pérdida de gas del deshidratador desecante (scf/año)
H	= Altura de la cámara del deshidratador (pies)
D	= Diámetro interior de la cámara (pies)
P ₁	= Presión atmosférica (psia)
P ₂	= Presión del gas (psig)
Π	= pi
%G	= Por ciento del volumen empacado de la cámara que es gas
T	= Tiempo entre rellenos (días)

Dada la siguiente información:

H	= 76.75 pulg. (6.40 pies) ¹
D	= 19.25 pulg. (1.6 pies)
P ₁	= 14.7 psia
P ₂	= 450 psig + 14.7 (464.7 psig)
Π	= 3.14
%G	= 45% (regla general del distribuidor) ¹
T	= 7 días

Calcule:

$$\begin{aligned}
 \text{GLD} &= \frac{(H * D^2 * \Pi * P_2 * \%G * 365 \text{días/año})}{(4 * P_1 * T * 1,000 \text{cf/Mcf})} \\
 &= \frac{(6.4 * 1.6^2 * 3.14 * 464.7 * 0.45 * 365)}{(4 * 14.7 * 7 * 1,000)} \\
 &= 10 \text{ Mcf/año}
 \end{aligned}$$

¹ Se basa en datos de productos provistos por Van Air.

Cuadro 13: Ahorro total de gas

Calcule:

TGS	= Ahorros totales de gas (Mcf/año)
	= Cuadro 8 + Cuadro 9 + Cuadro 10 + Cuadro 11 - Cuadro 12
	= 69 + 504 + 17 + 483 - 10
	= 1,063 Mcf/año
Ahorros	= 1,063 Mcf/año * \$3/Mcf
	= \$3,189/año

Reducción de emisiones de metano

TMER	= Reducción total de emisiones de metano
TMER	= 90% * (Cuadro 8 + Cuadro 9 - Cuadro 12)
	= 0.9 * (69 + 504 - 10)
	= 507 Mcf/año

Determinación de los ahorros de las operaciones y el mantenimiento

Otros ahorros incluyen la diferencia entre el costo de operación y mantenimiento (costo de mano de obra) de un deshidratador desecante y un deshidratador de glicol.

El costo de operación de un deshidratador desecante incluye el costo de relleno de desecante, el desecho del agua salada y los costos de mano de obra. Ya que el deshidratador desecante no tiene partes móviles y no requiere energía para funcionar, los costos de mantenimiento son insignificantes. El costo de relleno y desecho de agua salada calculado anteriormente en el Cuadro 7 es de \$2,059 y \$14 al año, respectivamente. Los costos de mano de obra suponen una hora a la semana para que el operador rellene el deshidratador desecante. A \$30 por hora, esto costaría aproximadamente \$1,560 al año.

El costo de operación del deshidratador de glicol incluye llenar el colector de glicol para mantener los niveles de glicol. El mantenimiento y la mano de obra incluyen la inspección y la limpieza de los sistemas mecánicos, la reparación regular de la bomba de circulación y los controles mecánicos, y una vez al año la limpieza de los tubos de incineración del rehervidor y el calentador de gas. El costo de glicol es \$4.50 por galón, y generalmente la tasa de producción es de 0.1 galones por MMcf de gas procesado. Para este ejemplo, esto viene siendo aproximadamente 37 galones de glicol al año, o \$167 al año. El costo de mano de obra supone que los operadores pasan un promedio de dos horas a la semana dando mantenimiento y reparación a la unidad. A \$30 por hora, esto costaría aproximadamente \$3,120 al año. Las piezas de repuesto se calculan a la mitad del costo de mano de obra, o \$1,560 al año. Basándose en esto, el costo total de operación, mantenimiento y mano de obra en nuestro ejemplo del sistema de deshidratador de glicol es de \$4,847 al año.

Paso 5: Análisis de los aspectos económicos. El paso final es comparar el costo de implementación y de operación y mantenimiento anual de cada opción y el valor del gas ahorrado o usado/perdido por cada unidad. El Cuadro 14 ofrece una comparación de los costos de implementación y operación y mantenimiento de un deshidratador desecante y un deshidratador de glicol (deshidratando 1 MMcfd de gas natural a una presión de 450 psig y una temperatura de 47°F). El Cuadro 15 compara la cantidad y el valor del gas usado y perdido en cada sistema.

El Cuadro 16 muestra los ahorros que puede esperar tener un participante de Natural Gas STAR durante un período de 5 años si reemplaza el deshidratador de glicol existente de 1 MMcfd a 450 psig y gas a 47°F por un deshidratador desecante.

Cuadro 14: Comparación de costo de un deshidratante desecante y un deshidratador de glicol

1 MMcfd de gas natural operando a 450 psig y 47°F

Tipo de costo y ahorro	Desecante (\$/año)	Glicol (\$/año)
Costos de implementación		
Costos de capital		
Desecante ¹ (incluye el relleno inicial)	13,000	
Glicol		20,000
Otros costos (instalación e ingeniería) ²	9,750	15,000
Costos totales de implementación:	22,750	35,000
Costos anuales de operación y mantenimiento		
Desecante		
Costo de relleno de desecante ³ (\$1.20/lb)	2,059	
Costo de desecho de agua salada ³	14	
Costo de mano de obra ⁴	1,560	
Glicol		
Costo de relleno de glicol ⁴ (\$4.50/gal)		167
Costo de materiales y mano de obra ⁴		4,680
Costos anuales totales de operación y mantenimiento:	3,633	4,847

¹ Se basa en dos cámaras desecantes usadas alternadamente. Vea el Cuadro 5.

² Costos de instalación supuestos al 75% del costo del equipo.

³ Los valores son del Cuadro 7.

⁴ Vea el Paso 4, Cálculo de ahorros.

Cuadro 15: Uso/pérdida de gas y comparación del valor

1 MMcfd de gas natural operando a 450 psig y 47°F

Tipo de pérdida/uso	Desecante		Glicol	
	Mcf/año	\$/año¹	Mcf/año	\$/año¹
Uso de gas				
Combustible (Cuadros 10 y 11)	—	—	500	1,500
Pérdida de gas				
Dispositivos neumáticos (Cuadro 9)	—	—	504	1,512
Ventilas (Cuadros 8 y 12)	10	30	69	207
Total:	10	30	1,073	3,219
Emisiones de metano ² :	10	—	507	—

¹ El precio del gas está basado en \$3/Mcf.

² Los valores son del Cuadro 12 y el Cuadro 13.

Cuadro 16: Aspectos económicos del reemplazo de un sistema de deshidratador de glicol por un sistema de deshidratador desecante con dos cámaras

Tipos de costos y ahorros¹	Año 0 (\$/año)	Año 1 (\$/año)	Año 2 (\$/año)	Año 3 (\$/año)	Año 4 (\$/año)	Año 5 (\$/año)
Costos de capital	(22,750)					
Costos de operación y mantenimiento que se evitaron		4,847	4,847	4,847	4,847	4,847
Costos de operación y mantenimiento - Desecante (\$/año)		(3,633)	(3,633)	(3,633)	(3,633)	(3,633)
Valor del gas ahorrado		3,219	3,219	3,219	3,219	3,219
Valor excedente del equipo	10,000 ²					
Total (\$)	(12,750)	4,433	4,433	4,433	4,433	4,433

NPV (Valor neto presente)³ = \$3,137
IRR (Tasa interna de rendimiento)⁴ = 21%
Período de recuperación de la inversión (años) = 2.9

¹ Los valores de todos los costos se obtienen en los Cuadros 14 y 15. El precio del gas se supone que es \$3/Mcf.
² Se basa en el 50% del costo de capital del deshidratador de glicol.
³ El NPV se calcula de acuerdo con 10% de descuento durante 5 años.
⁴ El IRR se calcula en base a 5 años.

Lecciones aprendidas

Los deshidratadores desecantes pueden reducir económicamente las emisiones de metano de la deshidratación de gas. La experiencia de los participantes ofrece las siguientes lecciones aprendidas:

- ★ Los deshidratadores desecantes pueden ofrecer beneficios económicos importantes, como un aumento de la eficiencia operativa y una reducción de capital y costos de mantenimiento para el gas de flujo lento a presiones más altas y condiciones de temperatura más bajas.
- ★ Los costos de preparación (reemplazo) del desecante son levemente más altos que el glicol debido a que el desecante se disuelve en agua y debe reemplazarse con regularidad, mientras que el glicol se recircula.
- ★ Los deshidratadores desecantes son un método eficaz para la eliminación de emisiones de metano, componentes orgánicos volátiles y contaminantes peligrosos del aire.
- ★ Incluir la reducción de emisiones de metano que pueden atribuirse al reemplazo de los deshidratadores de glicol por deshidratadores desecantes en los informes anuales del Programa de Natural Gas STAR.

Nota: La información de costo provista en este documento se basa en cálculos para Estados Unidos. Los costos de equipo, mano de obra y el valor del gas variarán dependiendo del lugar, y podrían ser mayores o menores que en los Estados Unidos. La información sobre costo presentada en este documento solamente debe usarse como guía al determinar si las tecnologías y las prácticas son convenientes económicamente para sus operaciones.

Referencias

- Acor, Lori G. y David Mirdadian. *Benefits of Using Deliquescent Desiccants for Gas Dehydration*. Society of Petroleum Engineers (SPE82138), 2003.
- Bowman, Bob. *Benefits of Using Deliquescent Desiccants for Gas Dehydration*. Society of Petroleum Engineers (SPE 60170), 2000.
- Dow Chemical Company, materials impresos del producto. *Gas Dehydration with PELADOW DG Calcium Chloride*.
- Energy Information Administration. *Monthly Energy Review*, 2002, Tabla A4.
- Eskrigge, Charles. Air and Vacuum Process Inc. (Van Air), contacto personal.
- Gas Processors Supply Association. *Engineering Data Book*, Volumen II, 11th edición, 1998, Sección 20-Deshidratación.
- Gas Research Institute. *Atlas of Gas-Related Produced Water for 1990*. (GRI-95/0016, mayo 1995).
- Gas Research Institute. *Methane Emissions From the Natural Gas Industry*, 1996, Volumen 12 (GRI-94/0257.29). Junio de 1996.
- Murray, Curt. *Practical Methods of Drying Natural Gas*. Pride of the Hills MFG., Inc.
- Murray, Curt. Pride of the Hills Mfg., Inc., contacto personal.
- Smith, Reid. BP, contacto personal.
- The Hanover Compressor Company. contacto personal.
- Tingley, Kevin. U.S. EPA Natural Gas STAR Program, contacto personal.
- Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos. *Lecciones Aprendidas: Optimización de la circulación de glicol e instalación de los depósitos separadores de líquido en los deshidratadores de glicol (Optimize Glycol Circulation and Install Flash Tank Separators in Glycol Dehydrators)*. (EPA430-B-03-013, mayo de 2003).
- Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos. *Lecciones Aprendidas: Reemplazo de bombas de glicol auxiliadas con gas por bombas eléctricas (Replacing Gas—Assisted Glycol Pumps with Electric Pumps)*. (EPA430-B-03-014, mayo de 2003).
- Vavro, Matthew E. *Minimizing Natural Gas Dehydration Costs with Proper Selection of Dry Bed Desiccants and New Dryer Technology*. Society of Petroleum Engineers (SPE37348), 1996.
- Zavadil, Duane. Williams Production, contacto personal.

Apéndice A

Contenido de humedad de gas natural en equilibrio con desecantes (lb de agua/MMcf de gas natural)

Tabletas tipo desecante de sales delicuescentes de cloruro de calcio

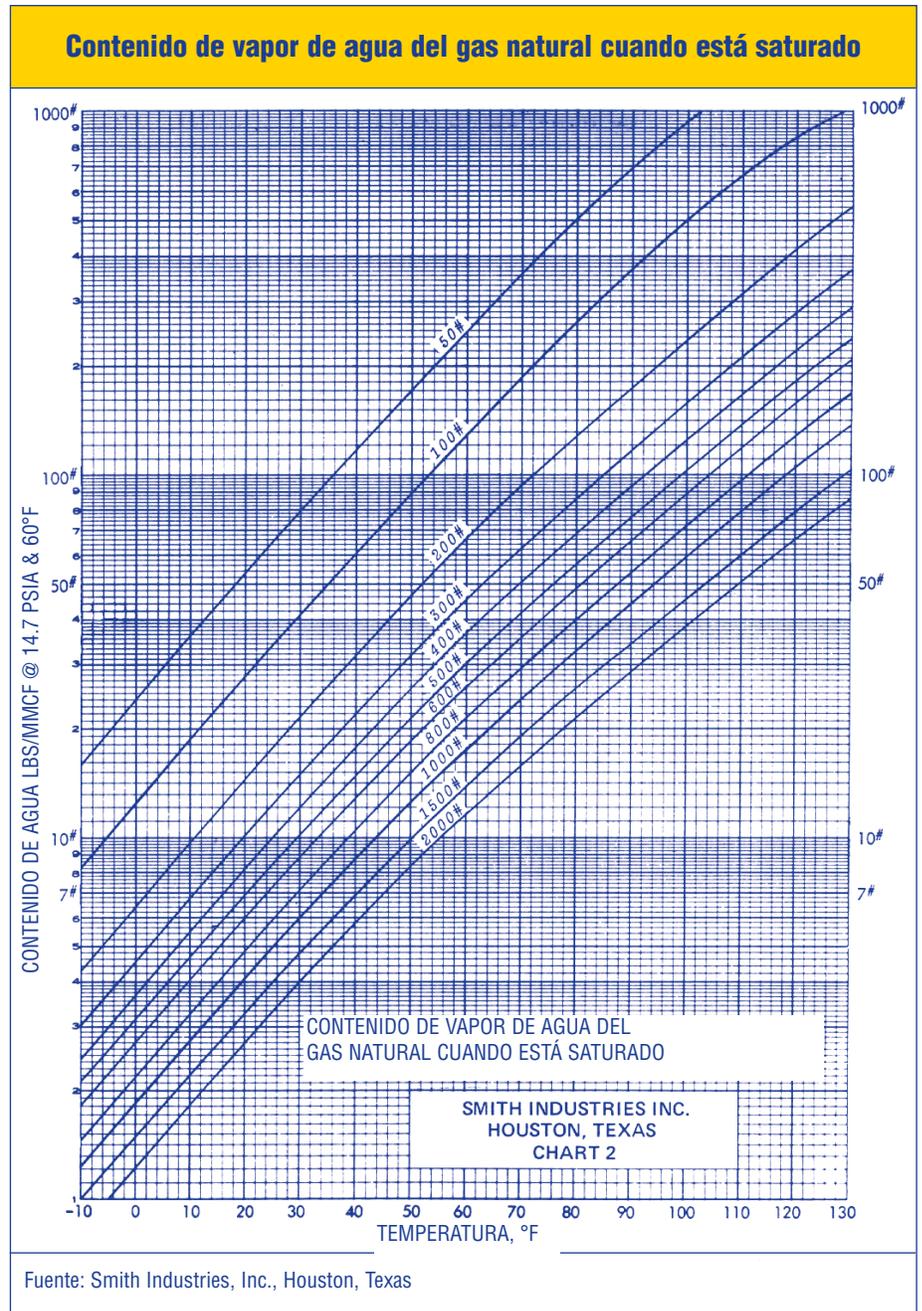
	10	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	350	400	500	750	1000	
	PSIG																		
80°F	344	219	134	98	77	64	55	48	43	39	35	33	30	27	23.6	19.7	14.3	11.6	
75°F	292	186	113	83	65	54	46	41	36	33	30	28	26	22.5	20.1	16.8	12.2	9.9	
70°F	246	157	96	70	55	46	39	43	31	27	25	23.4	21.7	19.1	17.1	14.3	10.4	8.5	
65°F	207	132	81	59	47	39	33	29	26	23.5	21.4	19.8	18.4	16.2	14.5	12.1	8.9	7.3	
60°F	174	111	68	50	39	33	29	24.5	21.9	19.8	18.1	16.8	15.5	13.7	12.3	10.3	7.6	6.2	
58°F	162	103	63	46	36	31	26	22.8	20.3	18.4	16.8	15.6	14.4	12.9	11.4	9.6	7	5.8	
56°F	150	96	59	43	34	29	24.1	21.2	18.9	17.1	15.7	14.5	13.4	11.8	10.6	8.9	6.6	5.4	
54°F	140	89	55	40	32	26	22.5	19.8	17.6	16	14.6	13.5	12.6	11.1	9.9	8.3	6.2	5.1	
52°F	130	83	51	37	29	24.5	21	18.4	16.4	14.9	14.4	12.6	11.7	10.3	9.3	7.8	5.8	4.7	
50°F	121	77	47	35	27	22.8	19.5	17.1	15.3	13.9	12.7	11.7	10.9	9.6	8.6	7.2	5.4	4.4	
45°F	100	64	39	29	22.7	18.9	16.2	14.3	12.7	11.5	10.6	9.8	9.1	8	7.2	6.1	4.5	3.7	
40°F	83	53	32	24	18.8	15.6	13.4	11.8	10.5	9.6	8.8	8.1	7.5	6.7	6	5	3.8	3.1	
35°F	68	44	27	19.6	15.5	13	11.1	9.8	8.7	7.9	7.2	6.7	6.2	5.5	5	4.2	3.1	2.6	

Tabletas tipo desecante de sales delicuescentes de cloruro de litio

	10	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	350	400	500	750	1000	
	PSIG																		
80°F	128	81	50	36	29	23.7	20.2	17.8	15.8	14.3	13	12	11.1	9.8	8.7	7.3	5.3	4.3	
75°F	108	69	42	31	24.2	20	17.2	15.1	13.4	12.1	11.1	10.2	9.5	8.3	7.4	6.2	4.5	3.7	
70°F	91	59	36	26	20.4	17	14.5	12.7	11.3	10.3	9.4	8.7	8	7.1	6.3	5.3	3.8	3.1	
65°F	77	49	30	21.9	17.2	14.3	12.2	10.8	9.6	8.7	7.9	7.3	6.8	6	5.4	4.5	3.3	2.7	
60°F	65	41	25	18.4	14.5	12.1	10.3	9.1	8.1	7.4	6.7	6.2	5.7	5	4.5	3.8	2.8	2.3	
58°F	60	38	23.4	17.1	13.5	11.2	9.6	8.4	7.5	6.8	6.2	5.7	5.3	4.7	4.2	3.5	2.6	2.1	
56°F	56	37	21.7	15.9	12.5	10.5	8.9	7.8	7	6.3	5.8	5.4	5	4.4	3.9	3.3	2.4	2	
54°F	52	33	20.3	14.8	11.7	9.7	8.3	7.3	6.5	5.9	5.4	5	4.6	4.1	3.7	3.1	2.3	1.8	
52°F	48	31	18.9	13.8	10.9	9	7.7	6.8	6.1	5.5	5	4.7	4.3	3.8	3.4	2.9	2.1	1.7	
50°F	45	29	17.5	12.8	10.1	8.4	7.2	6.4	5.6	5.1	4.7	4.4	4	3.5	3.2	2.7	2	1.6	
45°F	37	23.8	14.5	10.7	8.4	7	6	5.3	4.7	4.3	3.9	3.6	3.3	2.9	2.6	2.2	1.6	1.3	
40°F	30	19.6	12	8.7	6.9	5.8	4.9	4.4	3.9	3.6	3.2	3	2.8	2.4	2.2	1.8	1.4	1.1	
35°F	25	16.1	9.9	7.2	5.7	4.8	4.1	3.6	3.2	2.9	2.7	2.5	2.3	2	1.8	1.5	1.1	0.9	

Fuente: Van Air

Apéndice B





Agencia de Protección del Medio
Ambiente de los Estados Unidos
Aire y Radiación (6202J)
1200 Pennsylvania Ave., NW
Washington, DC 20460

EPA430-B-03-016S
Noviembre de 2003